



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Institut für Massivbau** <http://massivbau.tu-dresden.de>

**SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)**

# **LEICHT BAUEN MIT BETON**

**FORSCHUNG IM  
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542  
FÖRDERPHASE 1**

# Parabolrinnen für solarthermische Kraftwerke

Sören Müller  
Jürgen Schnell

Fachgebiet  
Massivbau und  
Baukonstruktion  
Technische  
Universität  
Kaiserslautern

Derzeit existieren weltweit unterschiedliche Formen von solarthermischen Kraftwerken, wobei Parabolrinnenkraftwerke bisher am wirtschaftlichsten sind. Deren Kollektorelemente werden i. d. R. als räumliche Stahlfachwerke mit punktförmig gestützten Spiegeln hergestellt. Eine Alternative dazu wird im Rahmen des SPP 1542 im Teilprojekt *Leichte verformungsoptimierte Schalentragwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke* erforscht. In diesem Projekt wurde ein Großdemonstrator realisiert, welcher die Machbarkeit solch innovativer Betonfertigteilschalen zeigt. Im vorliegenden Beitrag wird der Herstellungsprozess von der Idee über den Entwurf hin zur Realisierung des Großdemonstrators beschrieben. Die statische und dynamische Auslegung des Demonstrators oblag dem Projektpartner Prof. MARK (RUB).

## 1 Einleitung

Derzeit gibt es unterschiedliche Arten von als Concentrated-Solar-Power-Systeme (CSP) bezeichneten solarthermischen Kraftwerken (Bild 1). Ihr Funktionsprinzip ist die Konzentration der Solarstrahlen. Bei den diesem Beitrag zu Grunde liegenden Parabolrinnen handelt es sich um ein solches CSP-System. Auf die Rinne einfallende Solarstrahlung wird auf ein mit Glas ummanteltes, durch ein Vakuum umgebenes linienförmiges Absorberrohr fokussiert (z. B. [1]). Ein durch dieses Absorberrohr strömendes Thermoöl wird dadurch erhitzt. Die durch das Öl übertragene Wärme wird in einem konventionellen System zur Elektrizitätsgewinnung mittels Dampfturbinen in elektrische Energie umgewandelt.



Bild 1: Parabolrinnen der Plataforma Solar de Almería, Spanien

[Quelle:

[http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/images/SF/Parabol\\_Almeria.jpg](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/images/SF/Parabol_Almeria.jpg)]

An die Kollektorelemente müssen hohe Anforderungen gestellt werden, da der Systemwirkungsgrad vom Reflexionsgrad der Spiegel und von der geometrischen Genauigkeit der Spiegelfläche abhängt. So sinkt der Wirkungsgrad des gesamten Kraftwerks ab, sobald die ideale Parabelform der Spiegelfläche nicht mehr in ausreichendem Maße eingehalten wird, weil dann nicht mehr genügend reflektierte Sonnenstrahlen das Absorberrohr treffen. Deshalb ist nach [2] schon während des Herstellungsprozesses der Kollektoren als räumliche, filigrane Stahlfachwerke mit punktförmig gestützten Spiegелеlementen in Feldfabriken eine aufwändige Kontrolle der Genauigkeit erforderlich.

Nach [3] werden bei CSP-Anlagen photogrammetrische Messungen durchgeführt, um so Genauigkeitsanalysen zur Kontrolle der Verformungen erstellen zu können. Der Transport der Kollektorelemente an ihren Standort erfolgt nach deren Vormontage in einer Feldfabrik einzeln.

Folgende, dem oben beschriebenen Konstruktionsprinzip immanenten Aspekte sind nachteilig:

- ❑ Die Montage des Stahlfachwerks und der Spiegel sowie deren Einmessen sind zeit- und somit kostenaufwändig.
- ❑ Die Eigensteifigkeit der derzeit verwendeten Spiegelemente ist gering. Dies führt zu Deformationen infolge von Eigen- und Windlasten, was sich nachteilig auf die Vermeidung von Verformungen der Spiegelfläche auswirkt.
- ❑ Für solarthermische Kraftwerke geeignete Standorte liegen in der Regel in Wüstengebieten, wo häufig korrosive Umgebungsbedingungen anzutreffen sind, insbesondere an Einsatzorten in Nordafrika [4]. Salzhaltige Böden beispielsweise können die Lebensdauer einer Stahlstruktur verringern.

Die Entwicklung einer neuartigen Tragstruktur, die eine hohe Dauerhaftigkeit sowie Formbeständigkeit bei geringem Materialeinsatz und niedrigen Herstellkosten aufweist, erschien unter diesen Aspekten vielversprechend.

Als Kriterien bei der Auswahl des geeigneten Werkstoffs waren Wirtschaftlichkeit, Lebensdauer und mögliche Wertschöpfung vor Ort zu berücksichtigen. Dadurch setzte sich Hochleistungsbeton für die vorliegende anspruchsvolle Aufgabenstellung durch. Die zu meisternden, stets standortabhängigen Herausforderungen betreffen Fragen zu Betontechnologie, Schalungstechnik und Herstellverfahren.

## 2 Konzeptionierung eines Großdemonstrators

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln-Porz verfügt über einen Prüfstand Sopran zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit von Kollektorelementen, auf dem der bereits bestehende Kollektortyp PTC 1800 nach [6] umfassend getestet wurde. Das Konzept des im Folgenden beschriebenen Großdemonstrators aus Hochleistungsbeton ist eng an diesen Kollektortyp angelehnt.

Die Ausstattung des Großmodells mit einem elektrischen Antrieb erlaubt die automatische Ausrichtung der Parabolrinne im jeweils optimalen Winkel zur Sonne. Die Kenndaten des Kollektors des Demonstrators sind in Tabelle 1 und Bild 2 zusammengestellt. Der Fokuspunkt ist der Mittelpunkt des Absorberrohrs, die Fokallänge ist der Abstand zwischen dem Scheitel der Parabel und diesem.

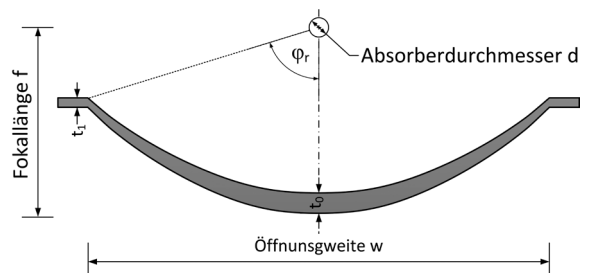


Bild 2 Querschnittsgeometrie des hergestellten Großdemonstrators

*Tabelle 1 Verschiedene Kenndaten des Großdemonstrators, Bezeichnungen gemäß Bild 2*

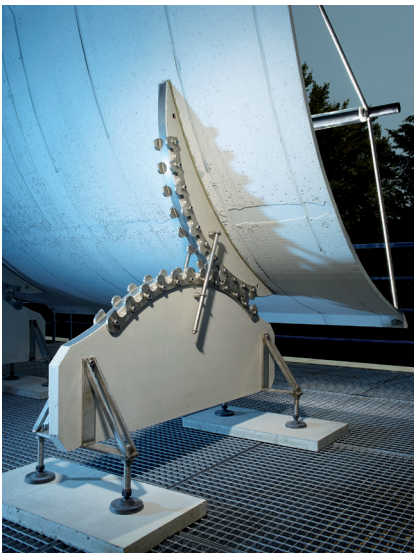
Kollektorlänge $l$ [m]	3,20
Öffnungsweite $w$ [m]	2,205
Fokallänge $f$ [m]	0,78
Schalendicke $t_i$ [mm]	20
Schalendicke $t_o$ [mm]	30
Öffnungswinkel $\phi_r$ [°]	70
Absorberrohrdurchmesser $d$ [mm]	51

Die Parabolrinnenlänge beträgt 3,20 m, ihre Öffnungsweite 2,205 m. Mit einer Schalendicke von nur 20 mm am Rand und 30 mm im Parabelscheitel wurde die Schale sehr schlank ausgeführt. An ihren Längsrändern ist sie versteift. Neben der Herstellung der Parabolrinne unter Verwendung des Werkstoffs Beton ist die für das hier vorgestellte Konzept verwendete patentrechtlich geschützte Auflagerkonstruktion eine zusätzliche Neuerung (siehe Bilder 3 und 4). Die Innovation hierbei ist, dass die Schwerachse stets auf einer Höhe bleibt. Dadurch ist zum Nachführen der Rinne nur noch minimaler Kraftaufwand erforderlich.

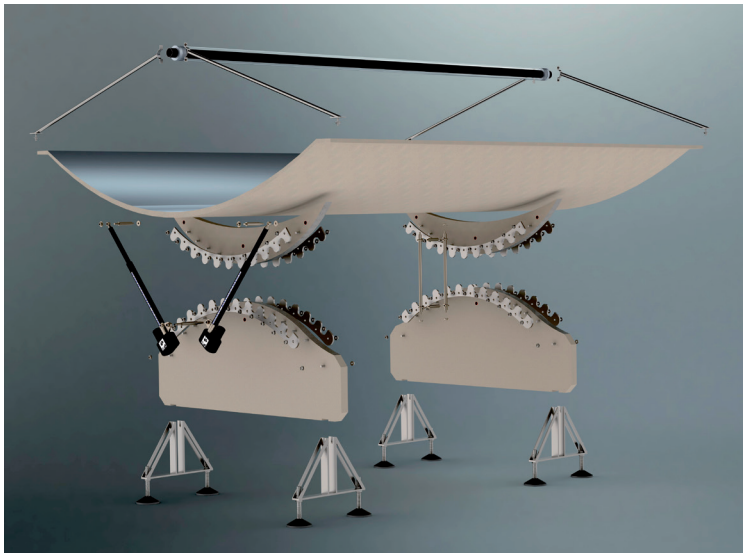
### 3 Herstellen des Großdemonstrators

#### 3.1 Allgemeines

Die komplette Herstellung des Großdemonstrators (siehe Bild 5) wurde an der Technischen Universität Kaiserslautern im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau durchgeführt.

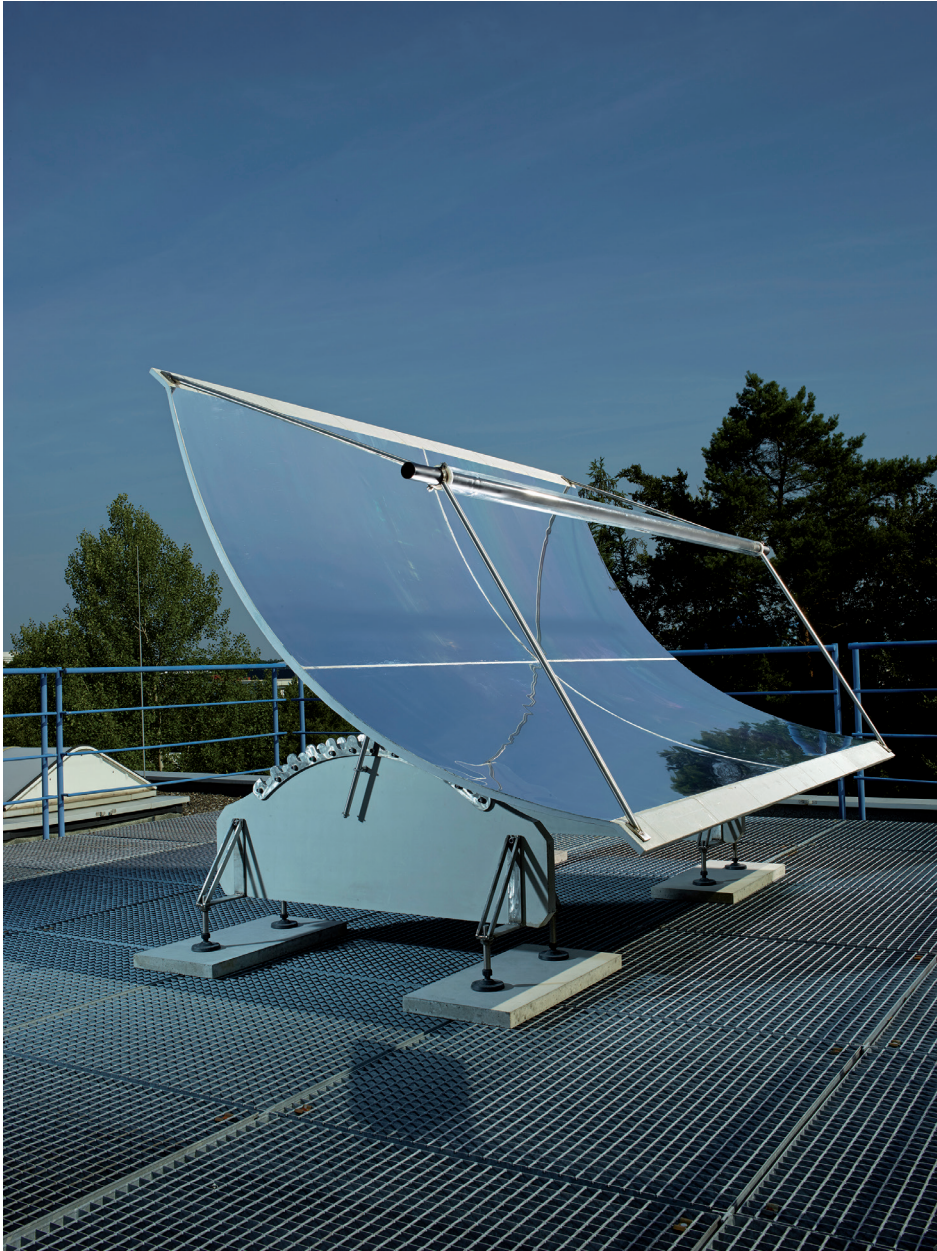


*Bild 3: Auflagerung des Demonstrators [Foto: Thomas Brenner]*



*Bild 4: Computeranimation des Großdemonstrators [Animation: Firma solarsolid]*





*Bild 5:  
Fertiger Großde-  
monstrator auf  
dem Campus der  
TU Kaiserslautern  
[Foto:  
Thomas Brenner]*

### 3.2 Schalung

Zur Betonage der Parabolrinne wurde eine Fratec®-Sonderschalung der Firma Max Frank GmbH und Co. KG eingesetzt. Diese Schalung besteht aus einem mittels CAD-Steuerung zugeschnittenen Polystyrolkern und einer Schalhaut aus selbstklebender Folie. Mit dieser aus einer Deckerschalung und aus einem Unterteil bestehenden Schalung wurde die Schale liegend betoniert, wobei das Einfüllen des Betons vom Scheitel aus erfolgte. Um eine lunkerfreie Schaleninnenseite realisieren zu können, wies die später zu verspiegelnde Seite dabei nach unten (siehe Bild 6). Für die Herstellung von Parabolrinnen im Rahmen einer Serienfertigung wäre diese Schalungsvariante aller-

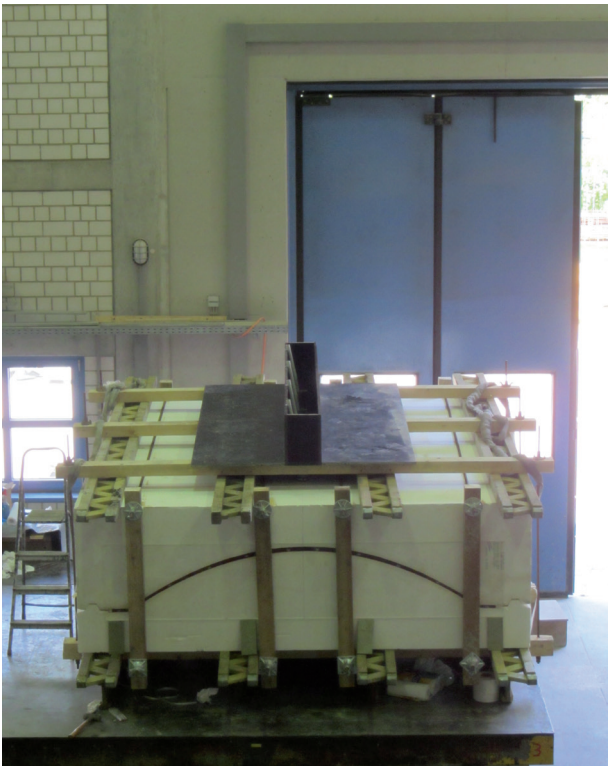


Bild 6: Betonierfertige Schalung im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern  
[Foto: Sören Müller]

dings ungeeignet. Dafür würde eine steife, vielfach wiederverwendbare robuste Schalung aus Stahl benötigt werden. Für das hier vorgestellte Forschungsprojekt war die Polystyrolschalung aber völlig ausreichend und hat hervorragend ihren Zweck erfüllt.

3.3 Nanodur®-Beton

Als Werkstoff für das oben genannte Forschungsvorhaben wurde ein hochfester Beton verwendet, der auf dem von der Firma Dyckerhoff hergestellten Bindemittel Nanodur® basiert. Im Vordergrund stand stets die Wettbewerbsfähigkeit einer Ausführung von Parabolrinnen in Betonbauweise gegenüber den derzeit konventionell hergestellten Kollektorelementen aus Stahl. Dazu ist es auch erforderlich, dass die Bauzeit eines Kraftwerks mit Betonkollektorelementen mit der eines konventionellen solarthermischen Kraftwerks konkurrieren kann. Deshalb wurde zum Beispiel auch die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers untersucht, um die Betonmischung für eine Serienfertigung in einer dafür notwendigen, aufwändigen Stahlschalung zwecks optimaler Ausnutzung und zur Erhöhung der Taktzeiten zu optimieren. Hierzu wurden an der TU Kaiserslautern drei verschiedene Betonrezepturen entwickelt. Diese unterscheiden sich einzig durch ihren Gehalt an Erhärtungsbeschleuniger: Für die Rezeptur M1 wurde kein

Erhärtungsbeschleuniger verwendet, M2 hat einen Erhärtungsbeschleunigergehalt von 2,0 Masse-% (bezogen auf den Zementgehalt) und bei M3 betrug dieser 4,0 Masse-%. Die drei Betonrezepturen sind in Tabelle 2 dargestellt. In Tabelle 3 sind einige Werkstoffigenschaften von M1 dokumentiert, da diese Mischung für die Herstellung des im Rahmen dieses Beitrags beschriebenen Großdemonstrators verwendet wurde.

Nanodur® Compound 5941 weiß ist eine Bindemittelvormischung auf Basis eines Zements CEM II/B-S 52,5 R. Dieser wird nach [7] mit Quarzmehl im Verhältnis 59 : 41 bei der Produktion vorgemischt. Als Erhärtungsbeschleuniger wurde das Produkt X-SEED® 100 der BASF eingesetzt, als Schwindreduzierer Eclipse® Floor der Firma Grace Bauprodukte GmbH und als Fließmittel das Produkt Glenium ACE 430 der BASF.

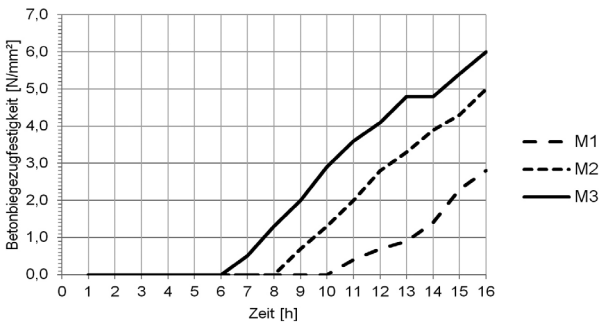


Bild 7: Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 (im Dreipunktbiegeversuch an Prismen 40 × 40 × 160 mm ermittelt, jeweils Mittelwerte aus drei Probekörpern)

Über einen Zeitraum von 16 Stunden wurde die Entwicklung sowohl der Betonbiegezugfestigkeit als auch der Prismendruckfestigkeit der drei oben beschriebenen Betonrezepturen untersucht, um den Einfluss des Erhärtungsbeschleunigergehaltes beurteilen zu können. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Bild 7 und Bild 8 dargestellt.

Tabelle 2 Betonrezepturen von M1, M2 und M3

Ausgangsstoff	Zusammensetzung [kg/m³]		
	M1	M2	M3
Nanodur® Compound 5941, weiß	1.042,0	1.042,0	1.042,0
Rheinsand 0/2	426,0	426,0	426,0
Basaltsplitt 1/3	882,0	882,0	882,0
Zugabewasser (ohne Fließmittel)	160,0	147,7	135,4
(3,3 M.-% vom Zementgehalt) Fließmittel Glenium ACE 430	20,3	20,3	20,3
Schwindreduzierer Eclipse® Floor	8,0	8,0	8,0
Erhärtungsbeschleuniger X-SEED® 100	-	12,3	24,6

Tabelle 3 Festbetoneigenschaften nach 28 d von Betonrezeptur M1  
(Mittelwerte, an der TU Kaiserslautern ermittelt)

Elastizitätsmodul	47.593,1 N/mm²
Biegezugfestigkeit	15,1 N/mm²
Zylinderdruckfestigkeit	109,1 N/mm²
Festbetonrohichte	2.524 kg/m³

Erwartungsgemäß ist mit zunehmendem Gehalt an Erhärtungsbeschleuniger ein früheres Einsetzen der Entwicklung der Betonbiegezugfestigkeit festzustellen. Bei den beiden Mischungen mit Erhärtungsbeschleuniger verläuft die Zunahme der Festigkeiten annähernd parallel und schneller als bei der Mischung M1. Dies ist am steileren Anstieg der Kurven zu erkennen. Auf die Entwicklung der Druckfestigkeit wirkt sich der verwendete Erhärtungsbeschleuniger lediglich unterproportional aus.

Alle drei Mischungen sind grundsätzlich selbstverdichtend. Auf Nanodur® Compound 5941 weiß basierender Beton weist eine hefeteigartigen Konsistenz auf. Aus diesem Grund sind übliche Frischbetonuntersuchungen ungeeignet, die Frischbetoneigenschaften dieses Betons sachgerecht beurteilen zu können. Es ist unumgänglich, die Betonrezeptur individuell für die Anforderungen des jeweiligen Bauteils anzupassen.

Für den praktischen Anwendungsfall wird nach derzeitigem Kenntnisstand die Mischung M2 empfohlen. Der Grund ist, dass mit ihr der immer einzugehende Kompromiss zwischen einer schnellen Festigkeitsentwicklung und einer guten Verarbeitbarkeit am besten hergestellt werden kann.

Da die Erhärtungsgeschwindigkeit, die durch die Verwendung eines Erhärtungsbeschleunigers bislang erzielt werden konnte, für eine wirt-

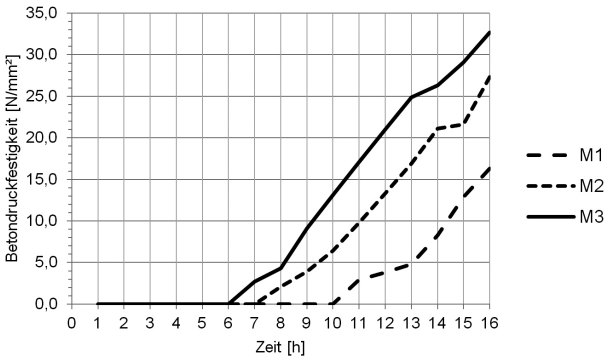


Bild 8: Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen M1, M2 und M3 (jeweils Mittelwerte aus sechs Probekörpern)

schaftliche Taktzeit noch gesteigert werden muss, wird derzeit die Kombination mit einer Wärmehaube untersucht.

### 3.4 Bewehrung

Der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens hergestellte Großdemonstrator wurde ausschließlich zur Gewährleistung der Transportsicherheit konstruktiv mit einer Betonstahlmatte Q188A bewehrt. Für zukünftige Betonkollektorgenerationen ist die Bewehrungstechnik zurzeit noch in der Entwicklung. Untersucht wird die Eignung von Bewehrungselementen aus metallischer Mikrobewehrung und aus glasfaser- oder carbonfaserverstärkten Kunststoffen.

### 3.5 Verspiegelung

Nach aktuellem Stand existieren derzeit drei unterschiedliche Konzepte, um die Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke zu verspiegeln:

- ☐ PVD-beschichtetes Aluminiumblech,
- ☐ Glas-, Silberspiegel,
- ☐ Reflektorfolie.

Die Verspiegelung des hier vorgestellten Großdemonstrators wurde mittels eines PVD-beschichteten Aluminiumblechs mit einer Stärke von 0,5 mm realisiert. Der Grund ist, dass dieses die einfachste Applizierbarkeit im Vergleich der drei oben beschriebenen Verspiegelungskonzepte aufweist. Um die Spiegelbleche mit der Betonschale zu verkleben, wurde das doppelseitige Haftklebeband Duplocoll® 5122 eingesetzt, das als Montagesicherung und gleichzeitig als Abstandhalter zur Erzielung der gewünschten Klebschichtdicke von 1 mm diente. Mit einer Zahnpachtel wurde zwischen dem Klebeband als reaktiver einkomponentiger Konstruktionsklebstoff Sikaflex®-552 appliziert. Dieser gewährleistet gemeinsam mit einer zuvor durchgeführten geeigneten Oberflächenvorbehandlung die Dauerhaftigkeit der Verklebung.

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der ersten Projektphase konnte gezeigt werden, dass zu den derzeit in Stahlbauweise konventionell hergestellten Kollektorelementen Parabolrinnen aus hochfestem Beton grundsätzlich eine Alternative darstellen können. Nicht zuletzt wegen ihrer Vorteile unter dem Gesichtspunkt der möglichen hohen Wertschöpfung vor Ort und der Dauerhaftigkeit in salzhaltigem Wüstenklima stellen sie besonders an Einsatzorten in Nordafrika eine attraktive Option dar. Auch wenn die Betonschalendicke nur wenige Zentimeter beträgt, weist sie wegen ihrer im Vergleich zu herkömmlichen Parabolrinnen hohen Steifigkeit nur geringe Verformungen auf. Dadurch können die reflektierten Solarstrahlen zielgenau im Absorberrohr konzentriert und ein hoher Gesamtsystemwirkungsgrad erreicht werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Spiegel selbst bei der Verwendung auf einer Betonschale keinerlei Eigensteifigkeit mehr aufweisen müssen. Dadurch könnten in Zukunft Spiegelfolien, extrem dünne Bleche und sogar reflektierende Oberflächenbeschichtungen verwendet werden.

In der zweiten Projektphase soll das Grundkonzept auf großformatige Betonstrukturen mit 30 m Elementlänge und mehr übertragen werden. Dann wird es erforderlich werden, Hohlstrukturen statt Massivschalen zu verwenden, um zu wirtschaftlichen Ergebnissen kommen zu können. Dies wird zusätzliche Herausforderungen an Herstellverfahren, Betontechnologie und Bewehrungstechnik mit sich bringen.



## Dank

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, durch deren finanzielle Unterstützung das Projekt *Leichte verformungsoptimierte Schalentragwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke* im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 *Leicht Bauen mit Beton* erst ermöglicht wurde. Weiterhin wurde das Vorhaben durch die umsichtige und kreative Koordination innerhalb des Schwerpunktprogrammes 1542 durch Dr.-Ing. SILKE SCHEERER wesentlich befördert. Hinsichtlich des gemeinschaftlich durchgeführten Teilprojektes ist die exzellente und freundschaftliche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern an der Ruhruniversität Bochum, Herrn Prof. Dr.-Ing. PETER MARK und Herrn Dipl.-Ing. PATRICK FORMAN, hervorzuheben. Herrn RAFFAEL WEISSBACH von der Firma solarsolid wird für seine hilfreichen Beiträge bei der Planung wie auch bei der Herstellung des Großdemonstrators herzlich gedankt. Des Weiteren danken die Autoren allen genannten Produktherstellern für ihre fachliche Beratung sowie für die Bereitstellung der benötigten Materialien.

## Literatur

- [1] NAVA, P.; LÜPFERT, E.; WOHLFAHRT, A.: Der Bau solarthermischer Kraftwerke – Produktion und Logistik der Montage. In: Produktionstechnologien für die Solarenergie. Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie in Kooperation mit dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), Leibniz-Universität Hannover, 2007.
- [2] POTTIER, K.; RÖGER, M.; LÜPFERT, E.: Parabolrinnenkontrolle in der Serienfertigung „Q-Foto“. 10. Kölner Sonnenkolloquium, 21.06.2007 in Köln-Porz, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e. V.), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Köln.
- [3] LÜPFERT, E.; ULMER, S.: Solar Trough Mirror Shape Specifications. Proceedings of the SolarPACES conference, Berlin, 15.-18. September 2009, DLR German Aerospace Center, Solar Research, Köln.
- [4] PEITSMEIER, H.: Der Wüstenstrom kommt 2020 nach Europa. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 8.06.2013.
- [5] Schutzrecht DE102011011805 A1, 23.08.2012, RAFFAEL WEISSBACH.
- [6] JANOTTE, N.; MEISER, S.; KRÜGER, D.; PITZ-PAAL, R.; FISCHER, S.; MÜLLER-STEINHAGEN, H.; WALDER, M.: Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit des Parabolrinnenkollektors PTC 1800. 19. Symposium Thermischer Solarenergie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, Bad Staffelstein, 06.–08.05.2009.
- [7] Produktdatenblatt Dyckerhoff Nanodur® Compound 5941. Dyckerhoff AG, Produktmarketing, Wiesbaden, Stand 05/2013.

### **Leichte verformungsoptimierte Schalentragwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke**

#### **Projektleiter**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

#### **Projektbearbeiter**

Dipl.-Ing. (FH) Sören Müller

#### **Projektlaufzeit**

11/2011 – 11/2014

#### **Projektpartner:**

Prof. Dr.-Ing. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum  
Dipl.-Ing. Patrick Forman, Ruhr-Universität Bochum  
(<http://www.massivbau.rub.de/>)

#### **Web**

<http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau/home/>